

粒子法を用いた振動水柱型波力発電装置の波浪中性 能解析法の開発に関する研究

著者	笹原 裕太郎
学位名	博士（工学）
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2016
学位授与番号	12614博甲第434号
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001427/

博士論文要約

論文題目： 粒子法を用いた振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析法の開発に関する研究

本研究は、海洋再生可能エネルギーを利用した発電装置の一形式である振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析に対して粒子法的一种である MPS 法を適用させ、その計算精度および妥当性について検討を行ったものである。本論文は全 5 章構成となっており、以下に各章の要約をまとめる。

第1章 序論

近年の世界的なエネルギー問題、特に地球温暖化に対しては、化石エネルギーの大量消費に伴う温室効果ガスの大量排出をいかに削減するかが重要である。地球先進国、開発途上国問わず化石エネルギー資源の利用を抑えるための効率的なエネルギー利用法や、再生可能エネルギー利用技術の発展が必要である。

そのような状況の中で我が国では、地球規模での環境問題への貢献と並び、国内のエネルギー安全保障の強化という観点からも再生可能エネルギーの利活用への期待が高まっている。我が国で利用可能な再生可能エネルギーの中でも、世界第 6 位の規模の領海および排他的経済水域に大量に賦存する海洋再生可能エネルギーへの関心が寄せられている。海洋再生可能エネルギーには、波力、潮流・海流、海洋温度差、洋上風力といった種類があるが、本研究では単位面積あたりのエネルギー密度が高くエネルギー損失が小さい波力エネルギーに着目した。

波力エネルギーを利用した発電装置である波力発電装置は、振動水柱型、可動物体型、越波型の 3 種類に大きく分類される。本研究では構造が簡素であり没水部に駆動部がなく、台風等の異常気象海象への対策が容易な振動水柱型波力発電装置に着目した。振動水柱型はこれまで長きに渡り多くの研究開発事例があるものの、スケール影響の再現が困難であること、および形状開発にかかるパラメータが多いこともあり高効率な装置開発における課題となっている。

近年では、上記課題を克服するために数値流体力学を利用した設計開発がなされており、これまで線形理論ベース CFD、メッシュベース CFD、メッシュフリー CFD が振動水柱型波力発電装置の性能解析に利用されてきた。本研究では、グリッド作成の必要がなく、気液

二相流の取扱いが容易、かつ強非線形現象へのロバスト性があるメッシュフリーに着目し、その中でも数値粘性の影響が比較的小さい MPS (Moving Particle Semi-implicit)法を選択した。しかしながら、MPS 法を用いて振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析を行った例は著者の知る限り存在しない。そこで本研究では、MPS 法を用いて振動水柱型波力発電装置の基本性能から荒天化耐波性能までの広汎な波浪中性能解析手法を開発することを目的として、高精度気液二相流 MPS 法を開発の開発を行い、振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析への適用性の検討を行った。

第2章 高精度気液二相流 MPS 法の開発

MPS 法は非圧縮性流れ解析をラグランジュ描像により表現する手法であり、支配方程式は質量保存則である連続の式および運動量保存則である Navier-Stokes 方程式である。MPS 法では、Navier-Stokes 方程式に含まれている圧力項および粘性項に含まれている空間方向に関する微分演算子である勾配、発散および拡散に対応する粒子間相互作用モデルを用意することで支配方程式の離散化がなされる。MPS 法は半陰的な解法であり、圧力値を連続の式の離散化から導かれる圧力に関する Poisson 方程式を陰的に解くことで圧力勾配項の計算を行う。本研究では、従来、MPS 法における課題であった圧力振動および自由表面の不安定性を克服し計算精度を向上させるため、圧力の Poisson 方程式の修正ソース項の導入ならびに高精度勾配モデルおよび高精度発散モデルの導入を行った。また、気液二相流の取扱いに関しては従来の圧力計算時に気液相間のリンクを切断するという手法を踏襲しつつ、数値安定性および計算精度を向上させるために高精度外気圧モデルの導入を行った。

本章で開発した高精度気液二相流 MPS 法の計算精度を確認するために静的問題および動的問題について検証計算を行った。本章で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 静的問題として矩形水槽における自由表面の座標振動および作用空気圧を解析対象とした数値シミュレーションを実施した。標準手法および本研究での開発手法の計算結果を比較した結果、自由表面座標については圧力のポアソン方程式の改良に起因する体積減少が僅かに見られるものの、標準手法と比較して自由表面粒子の振動が大きく抑えられていることが示された。また、自由表面粒子への作用空気圧についても開発手法は標準手法と比較して圧力振動を大きく抑えることができた。また、気相高さを変えた数値シミュレーションの実施により、この計算精度向上については気相高さの影響によらないことも示された。
- (2) 動的問題として、水柱崩壊の数値シミュレーションを実施した。標準手法では水塊の壁面への衝突時に気相粒子に異常圧力が生じ計算が発散したが、開発手法では安定して計算を実施することができた。また、水塊の先端位置の時間変化を実験値と比較し

た結果、液相粒子と壁粒子との間の数値摩擦に起因する誤差がみうけられたものの計算結果は実験結果を良好な精度で再現できていることが示された。

本章での成果より、これまで単相流 MPS 法で用いられてきた計算精度向上化手法は気液二相流 MPS 法に対しても有効であることが示された。本研究で開発した高精度気液二相流 MPS 法は標準気液二相流 MPS 法と比較して物理的な妥当性を担保しつつ計算安定性の向上を示すことができた。

第3章 振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析への高精度気液二相流 MPS 法の拡張

本研究で開発された高精度気液二相流 MPS 法は、標準型気液二相流 MPS 法からの計算精度の向上が示された。本章では、高精度気液二相流 MPS 法の有効性について、実在する岸壁設置型振動水柱型波力発電装置を模擬した数値モデルを用いて極限現象として扱える一発大波中応答シミュレーションの実施により検討を行った。その結果、以下のような知見を得ることができた。

- (1) 本手法は空気巻き込みを伴う一発大波に対する沿岸固定式 OWC 型波力発電装置の応答解析シミュレーションのような非線形性の強い現象を十分に表現しており、荒天下での OWC 型波力発電装置の波浪中応答解析に対する強力な手法である。
- (2) 入射波の砕波形状には空気粒子の影響が局所的に表れるものの、飛沫形状や構造体前面における衝撃砕波力は疑似的な空気圧の付加により空気粒子の存在を仮定できることから、空気室外の空気粒子を省略可能であり計算コストを削減できる。

また、OWC 型波力発電装置の応答解析のための計算手法拡張の必要性について論じ、拡張モデルを導入した拡張型高精度気液二相流 MPS 法の開発および妥当性について検討を行った。以下に、拡張型高精度気液二相流 MPS 法について本章で得られた知見を示す。

- (1) バックステップ流れの数値シミュレーションの空間解像度に関する感度解析を含めて実施した。再付着距離および水平方向流速に関する実験結果や既存の数値計算結果と比較して本手法は遜色ない結果を得ることができた。なお、既存の結果と良好な精度で現象を再現するためにはステップ高さに対して 1/20 程度の粒子間距離で計算する必要がある。
- (2) 空気室を再現した空気流挙動シミュレーションを実施し、TF-MPS-HGD-SII による計算結果と比較した。その結果、ノズル境界により総粒子数の削減に伴う計算コストの軽減がなされた。また、負圧の考慮およびディリクレ境界条件判定の変更による空気室内での非物理的な空白領域の発生を抑制することができ、空気室内解析の計算精度を向上させる事ができた。
- (3) 2次元ベンチュリ管シミュレーションにより、気液界面を介した気相粒子と液相粒子

の相互作用に関する妥当性の検討を行った。左右の管内自由表面の水位差に関する計算結果は解析解と良好に一致しており、本手法の妥当性を示すことができた。

以上より、本章で得られた結果は空気室内でのオリフィス近傍での空気流挙動ならびに気液界面の相互作用の妥当性の担保、および空気室内における非物理的な数値現象の排除を示しており、**Ex-TF-MPS-HGD-SII** は **OWC** 型波力発電装置の波浪中性能解析へ適用するために必要な基礎的な妥当性を示すことができたといえる。

第4章 振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析への適用性の検討

本研究で開発した拡張型高精度気液二相流 **MPS** 法は振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析を実施するにあたり必要となる各種物理現象に対する妥当性および計算精度の向上を示した。本章では、固定式振動水柱型波力発電装置を対象として拡張型高精度気液二相流 **MPS** 法を用いた波浪中性能解析を実施した。

本章では、既存の固定式振動水柱型波力発電装置の水理実験の再現を目的として 2 次元数値波動水槽を用いた数値シミュレーションを実施した。再現対象の固定式振動水柱型波力発電装置は単純な側面開放型の矩形形状であり、入射波条件は全 12 パターンとした。タービン負荷を模擬するオリフィス径は空気室内水線面積の 1/100 相当となるようにノズル境界条件を設定している。解析対象は空気室内の水位変動、圧力変動ならびに一次変換効率であり、入射波波高または入射波周期に対する無次元値を用いて再現対象の実験結果および近似理論計算結果との比較を行う。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 数値計算結果より、空気室内応答に関する水位変動および圧力変動時系列より、各応答間の位相差は物理的に齟齬が認められないことから、本計算は物理的に妥当性をもって現象を再現できていると言える。
- (2) 空気室内の無次元水位、無次元圧力ならびに一次変換効率に関して **Ex-TF-MPS-HGD-SII** による数値計算結果と既存の実験結果および近似理論計算結果との比較により、カーテンウォール厚さの違いによる渦放出およびノズル部における三次元影響による誤差が認められるものの大局的には本手法による計算結果は実験結果を概ね再現することができたといえる。

以上の結果から、本研究で開発した拡張型高精度気液二相流 **MPS** 法は固定式振動水柱型波力発電装置の波浪中性能解析シミュレーションに対する適用性を示したといえる。計算コストを増加させずに空間解像度を向上させるためには格子法で一般的に用いられている可変解像度を導入する必要がある。また、拡張型高精度気液二相流 **MPS** 法による計算結果だけでなく多くの理論解析手法および数値解析手法の適用範囲を統一的に評価するためにベンチマーク実験の実施が求められていくと考えられる。

第5章 結論

本研究で開発した拡張型高精度気液二相流 MPS 法は、第 2 章ならびに第 3 章においてそのモデル化および開発モデルについて説明がなされた。また、第 2 章および第 3 章における各種検証計算により物理現象の再現に関する妥当性が示された。さらに第 4 章では本手法の振動水柱型波力発電装置の波浪中応答解析への適用性が十分にあることが明らかにされた。一方で今後も継続して改良を行っていく必要がある。例えば、計算コストを抑えつつ構造体近傍での空間解像度を向上させるための可変解像度アルゴリズムの導入や、カーテンウォール近傍での渦放出をより詳細に評価するための乱流モデルの導入が考えられる。また、MPS 法では計算領域を正方格子状に並べた粒子で表現するため滑らかな曲面を持った境界の再現が困難である。今後、より空気室や構造体の設計パラメータの自由度を高めるために計算領域のより柔軟な生成手法が必要になると考えられる。

以上